

شبیه‌سازی و بررسی لایه‌نشانی لایه‌های نازک فلزی به روش تبخیر حرارتی

جواد علی‌پور زردکوهی^۱، فاطمه شریعتمدار طهرانی^{۱*} و مریم علیان‌نژادی^۱

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

لایه‌های نازک فلزی به دلیل کاربرد گسترده در حوزه‌های مرتبط با سلول خورشیدی، حسگر، میکروسکوپ الکترونی و طیف‌سنجی، تشخیص و درمان بافتهای سرطانی، هوافضا، ارتباطات راه دور، لیزرها، خودرو و ... مورد توجه خاص قرار دارند. در این مقاله، فرایند لایه‌نشانی فلزات کاربردی آلومینیم، مس، قلع و نقره با روش تبخیر حرارتی با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نوع فلز بر ضخامت لایه‌های نازک تاثیر بسزایی دارد اما مقدار یکنواختی ضخامت لایه‌ها مستقل از این پارامتر است. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که تغییر فشار باعث تغییر توزیع ضخامت می‌شود اما مقدار یکنواختی ضخامت لایه‌ها را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. همچنین، نرخ لایه‌نشانی فلزات بالا در فشار ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال آورده شد. **واژه‌های کلیدی:** لایه‌های نازک فلزی، تبخیر حرارتی و فرایند لایه‌نشانی.

ایمیل نویسنده مسئول: f_tehrani@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

لایه‌نشانی لایه‌های نازک فلزی به دلیل کاربردهای گسترده در حوزه‌های مرتبط با سلول‌های خورشیدی، فن‌آوری‌های حسگر، پزشکی مثل تشخیص بافتهای سرطانی و میکروارگانیسمها، درمان سرطان، انتقال دارو و ژن، هوافضا، خودرو و طیف گسترده‌ای از کاربردهای نوری مثل کاربرد در لیزرها، آینه‌ها و منعکس‌کننده‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نیاز به بازتاب‌دهنده‌های نور و گرما به دلیل رشد سریع جمعیت جهانی، توسعه صنعتی و نیازهای داخلی به طور مداوم در حال افزایش است. بازتاب انرژی خورشیدی می‌تواند استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر مثل سوخت‌های فسیلی، سوخت‌های نفتی و مواد معدنی را کاهش دهد. از طرفی با رشد سریع لیزرها نیاز به این لایه‌های نازک فلزی بیشتر حس می‌شود. لایه‌های نازک با توجه به کاربرد آنها به شش دسته لایه‌های نازک (روکش‌های) نوری، الکتریکی، مغناطیسی، شیمیایی، مکانیکی و حرارتی طبقه‌بندی می‌شوند.

بازتاب‌دهنده‌های انرژی خورشید در وسایل حرارتی خورشیدی مانند اجاق‌های خورشیدی برای پخت و پز، گرمایش آب، گرم و خنک‌کننده‌های فضا و فرایند تولید گرما کاربرد دارند. اجاق‌های خورشیدی دارای مزایایی مثل سهولت ساخت، فقدان دود و آلودگی هستند [۱]. آلومینیم به دلیل ارزان و فروانی، پیشرفت در فرایند استخراج

آن از سنگ معدن و ویژگی‌های منحصر به فردش یکی از پرمصرف‌ترین فلزات در اجزای ساختارهای متفاوت و بازتاب‌دهنده‌های آینه‌ای است. بازتاب سطح در واقع ویژگی نوری ذاتی آن سطح است. در بسیاری از کاربردهای نوری، الکترونی، ارتباطات راه دور، متمرکزکننده‌های خورشیدی و برنامه‌های معماری که باید انعکاس کنترل شود تا گرما کمتر هدر نرود و یا مانع ورود گرما شوند که از لایه‌های نازک آلومینیمی برای بازتاب طول موج فروسرخ استفاده می‌شود. در این موارد باید بازتاب IR بیشینه شود اما انتقال نور مرئی همچنان بالا باشد. متمرکزکننده‌های نور خورشید از بازتاب‌دهنده‌های منحنی برای تمرکز نور خورشید بر گیرنده استفاده می‌کنند. با توجه به مطالب بالا بررسی لایه‌نشانی آلومینیم بر سطوح متفاوت بسیار مهم است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که شرایط ایجاد لایه بر ویژگی‌های لایه ایجاد شده به شدت تاثیر دارد. به‌تازگی، لایه نازک آلومینیم با استفاده از فناوری کندوپاش مغناطیسی در نرخ‌های لایه‌نشانی متفاوت و شار آرگون متفاوت گزارش شده است [۲]. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که پاسخ UV-مرئی-NIR در گستره طول موج ۲۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر به‌تقریب یکسان است و بازتاب بالاتر از ۹۶٪ برای تمام این لایه‌ها به دست آمده است. البته مقدار زبری این سطوح بسیار متفاوت بوده است.

خورشید یکی از مهمترین منابع طبیعی انرژی است زیرا تمیز، ارزان و عاری از انتشار مواد سمی است و می‌تواند به منابع دیگر انرژی تبدیل شود. جاذب نور خورشید وظیفه جذب انرژی خورشید را دارد. سپس، این انرژی به سایر شکل‌های انرژی قابل استفاده‌تر یا قابل ذخیره‌سازی تبدیل می‌شود. جاذب‌های مورد استفاده در جمع‌کننده‌های خورشیدی باید جذب بالایی در ناحیه UV-مرئی و انتشار پایینی در ناحیه NIR طیف داشته باشند. روش‌های متفاوت بر پایه سازوکارهای جذبی مثل گیراندازی نور، لایه‌نشانی نرات با فناوری‌های خلاء، لایه‌نشانی فلزاتی مثل کروم و نقره با الکترولیت، EPD و سل-ژل برای ایجاد سطوح جاذب نور خورشید به کار گرفته شده‌اند [۳]. به‌تازگی لایه‌های نانوذرات مس (CuNP) به همراه دو لایه روی و نیکل با استفاده از روش PVD بر زیرلایه آلومینیم لایه‌نشانی شده است [۴]. جاذب نور خورشید ایجاد شده دارای جذب بالایی نور خورشید به دلیل وجود لایه نازک مس است. همچنین، لایه نازک مس می‌تواند به‌عنوان زیر لایه برای رشد برخی مواد مورد استفاده قرار بگیرد [۵]. به‌تازگی رشد گرافن بر لایه نازک مسی که بر یاقوت لایه‌نشانی شده، گزارش شده است. نتایج نشان داد که ساختار بلوری و یکنواخت لایه نازک مس در شرایطی ایجاد می‌شود که دمای زیر لایه در طی فرایند لایه نشانی ۴۷۳K باشد. این لایه نازک مس قابلیت ایجاد گرافن کیفیت بالا را برای برخی مقاصد خاص مثل میکروسکوپ الکترونی و طیف‌سنجی دارد [۶]. افزون‌براین، به‌تازگی به منظور رشد گرافن لایه‌های نازک مس با ضخامت‌های ۳۰۰ و ۱۱۵۰ نانومتر بر سیلیکا ساخته و تاثیر بازپخت در دماهای ۹۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ و ۹۰ دقیقه بررسی و ساختار لایه نازک مس بهینه سازی شده است [۷].

هیبرید پروسکایت‌های هالید آلی-غیرآلی (OHP¹) در سلول‌های خورشیدی، حافظه مقاومت، دیودهای تابشگر نور و لیزرهای مقیاس کوچک کاربرد دارند. موضوع اصلی پژوهش در این حوزه یافتن ساختارهای OHP پایدار بدون سرب است که خصوصیات فیزیکی آن بدون تغییر باقی بماند. اهمیت حذف سرب به دلیل جلوگیری از سمیت و تأثیرات زیست محیطی این ماده و امکان استفاده OHP در فناوری‌های آینده است [۸]. قلع به عنوان

کاندیدی برای جایگزینی با سرب مطرح است. بازده تبدیل توان PCE² در حدود ۵ تا ۹ درصد برای این ساختار گزارش شده است [۹ و ۱۰]. به‌تازگی لایه نازک قلع بر پروسکایت ایجاد و تاثیر آن بر پایداری پروسکایت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۱۱]. همچنین، قلع اکسید به عنوان یکی از معدود نامزدهای مطرح برای ترانزیستورهای لایه نازک (TFTs³) نوع P است، زیرا در این مورد تحرک بالای حفره‌ها به مقدار قابل قبولی در لایه نانوبلوری حفظ می‌شود. با این حال، جریان خاموشی بالای این SnO₂ها موجب ایجاد محدودیت شده است. به تازگی ترانزیستور لایه نازک قلع اکسید با استفاده از تبخیر حرارتی تحت خلاء فوق‌العاده بالا ساخته شده است و برای غلبه بر مشکل جریان خاموشی بالا، ایتريوم به ساختار افزوده شده است [۱۲].

نقره فلزی با ویژگی شیمیایی و فیزیکی بی‌نظیر است که کاربردهای متعدد آن باعث توجه خاص به این فلز شده است. این فلز رسانای بسیار عالی گرما و برق است و در صنایع برق و الکترونیک، عکاسی، جواهرسازی و کاتالیست بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳ و ۱۴]. لایه‌های نازک نقره با ضخامت کمتر از چند صد نانومتر در حسگرهای گازی [۳]، قطعات فتوولتائیک [۴] و پزشکی کاربرد دارند. در پزشکی این لایه‌های نازک به دلیل خاصیت ضد میکروبی و ضد ویروس قوی در پیشگیری و درمان عفونت مهم هستند [۱۵ و ۱۶]. با کاهش ابعاد، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی جدید در ساختار ایجاد می‌شود. بنابراین، در سالهای اخیر تحقیقات زیادی بر کاهش ضخامت لایه نازک نقره متمرکز شده است تا عملکرد ضد میکروبی و ویروسی این نانو ساختارها بهبود یابد [۱۵ و ۱۶]. تاکنون روش‌های متفاوتی مبتنی بر PVD برای ایجاد این لایه‌های نازک به کار گرفته شده است و ایجاد لایه‌های نازک نقره بر بسپارها [۱۷] یا سطوح فلزی با طراحی نانو [۱۸] گزارش شده است. افزون‌براین، به‌تازگی لایه‌های نازک نقره با ضخامت ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون با روش فرسایش الکترونی پالسی^۴ ساخته شده است. نتایج حاکی از موثر بودن این شیوه‌ی ساخت و ایجاد لایه‌هایی با خلوص و یکنواختی بالا است [۱۹].

² Power conversion efficiency

³ Thin film transistors

^۴ Pulsed electron ablation

¹ Organic-inorganic halide perovskite

ماده هدف (چشمه) از طریق اعمال جریان الکتریکی و یا باریکه الکترونی تبخیر می‌شود و در دومی ذرات ماده هدف با استفاده از بمباران یونی (یونهای سنگین مانند آرگون) از سطح چشمه کنده شده و در نهایت به دلیل وجود اختلاف فشار به سمت زیر لایه گسیل می‌شوند. در این روش‌ها بخار ایجاد شده از ماده هدف در محفظه طی فرایندهای فیزیکی و بدون انجام واکنش‌های شیمیایی به یک لایه جامد بر زیر لایه تبدیل می‌شود.

شکل ۱ محفظه طراحی شده برای لایه نشانی تبخیر حرارتی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، زیر لایه بر یک نگهدارنده در یک فاصله مشخص از چشمه قرار می‌گیرد. این لایه نشانی باید در محفظه خلأ انجام پذیرد.

شار بخار مولکولی G در طی لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴].

$$G = - \int_{S'} \frac{J'(n.r)(n'.r)}{\pi r^4} dS' \quad (1)$$

که در اینجا J جریان بخار است و انتگرال بر سطح گرفته می‌شود. همچنین، فشار P برابر است با:

$$P = - \int_{S'} \frac{J'(n.r)^2 (n'.r)}{\pi r^5} \frac{M_n}{N_A} \langle C'_{3D} \rangle dS' + \frac{2JM_n}{3N_A} \quad (2)$$

که در اینجا:

$$\langle C'_{3D} \rangle = \sqrt{\frac{9\pi RT'}{8M_n}} \quad (3)$$

و M_n جرم مولی و N_A عدد اتمی ماده‌ای است که برای لایه‌نشانی در نظر گرفته شده است. چگالی تعداد n نیز در طی این فرایند با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$n = - \int_{S'} \frac{J'(n.r)}{\pi r^5} \left\langle \frac{1}{C'_{3D}} \right\rangle dS' + 2 \left\langle \frac{1}{C'_{3D}} \right\rangle J \quad (4)$$

که در اینجا:

$$\left\langle \frac{1}{C'_{3D}} \right\rangle = \sqrt{\frac{\pi M_n}{8RT'}} \quad (5)$$

شار گرمایی Q نیز برابر است با:

$$Q = - \int_{S'} \frac{J'(n.r)(n'.r)}{\pi r^4} \frac{M_n}{N_A} \langle C'^2_{3D} \rangle dS' - \frac{1}{2} \frac{M_n}{N_A} \langle C'^2_{3D} \rangle \quad (6)$$

با توجه به موارد بالا ساخت، تحلیل و آنالیز لایه‌های نازک آلومینیم، قلع، مس و نقره بسیار مهم است. روش تبخیر حرارتی یکی از روش‌های لایه نشانی فیزیکی PVD است که به طور متداول برای ساخت لایه‌های نازک فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای این روش می‌توان به ساده بودن دستگاه، قیمت مناسب‌تر، مواد مصرفی ارزاتر اشاره کرد. به طور کلی می‌توان فرایند لایه‌نشانی را به سه قسمت (الف) تبخیر ماده هدف به کمک چشمه تبخیر، (ب) انتقال بخار ماده از منبع به زیر لایه و (ج) چگالش ماده روی زیر لایه تقسیم کرد. شبیه‌سازی فرایند لایه‌نشانی یکی از روش‌های بررسی نتایج احتمالی است که در موفقیت شرایط بسیار حیاتی است. روش‌های متفاوت شبیه‌سازی مثل مونت‌کارلوی جنبشی (KMC)°، دینامیک مولکولی (MD)¶، المان محدود (FEM)¶ و تفاضل متناهی در محدوده زمانی^۸ (FDTD) اشاره کرد [۲۳-۲۰]. در این مقاله فرایند لایه نشانی لایه‌های نازک آلومینیم، قلع، مس و نقره با توجه به کاربرد گسترده آنها با روش تبخیر حرارتی در شرایط فشار بخار ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال شبیه‌سازی و نتایج مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به دانش نویسندگان مقاله تاکنون شبیه‌سازی با این محوریت انجام نشده است.

۲- مفاهیم و روش شبیه‌سازی

روش‌های متفاوتی برای ایجاد لایه نازک وجود دارد. یک دسته قابل توجه از این روش‌ها از این شیوه بهره می‌برند که در آن ماده‌ای در محفظه خلأ به فاز بخار تبدیل می‌شود و سپس، به صورت یک لایه جامد بسیار نازک بر سطح زیر لایه مترکم می‌شود. لایه‌نشانی لایه‌های نازک از فاز بخار به چندین شیوه انجام می‌شود که در این مقاله روش لایه‌نشانی فیزیکی بخار (PVD) برای لایه نشانی لایه های نازک بسیار کاربردی آلومینیم، قلع و مس شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه و تحلیل شده است. در مجموعه روش‌های PVD دو روش متداول تبخیر حرارتی^۹ و کندوپاش^{۱۰} قرار می‌گیرند که در اولی

⁵ Kinetic Monte Carlo

⁶ Moleculare Dynamice

⁷ Finite Element Method

⁸ Finite Difference Time Domain

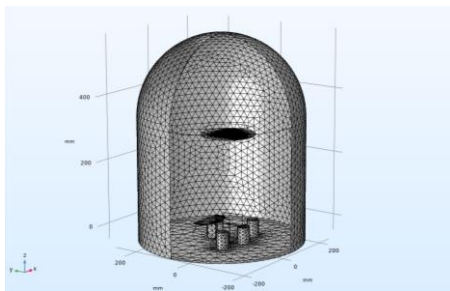
⁹ Thermal evaporation

¹⁰ Sputtering

می‌شود. از طرفی انتخاب مقادیر بزرگ نیز منجر به کاهش دقت محاسبات می‌شود، بنابراین، انتخاب مناسب مش‌بندی الزامی است. در این شبیه‌سازی مش‌بندی‌های متغیر در نواحی مختلف استفاده شد و شرایطی انتخاب شد که خطای محاسباتی کمتر از ۱۰٪ حاصل شود.

جدول ۱- مقادیر کمیتهای به کار رفته در شبیه‌سازی.

عنصر	وزن مولکولی (gr/mol)	چگالی (g/cm ³)	دمای بخار در فشار ۱۰۰Pa (K)
Ag (نقره)	۱۰۸/۸۷	۱۰/۵	۱۵۷۸/۸
Al (آلومینیم)	۲۶/۹۹	۲/۷	۱۸۱۸
Cu (مس)	۶۳/۵۵	۸/۹۶	۱۸۵۴
Sn (قلع)	۱۱۸/۷۱	۷/۳۱	۱۸۵۵



شکل ۲. نمایی از مش‌بندی به کار رفته در شبیه‌سازی.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

در شکل ۳-الف تا ۳-ج به ترتیب توزیع شار مولکولی تابش شده از سطوح در طی ایجاد لایه-های نازک آلومینیم، قلع، مس و نقره در فشار ۱۰۰Pa و در زمان ۱۲۰ ثانیه نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی کمترین میزان شار مولکولی تابش شده در تمام موارد در محل زیر لایه وجود دارد. همچنین، این شار به ترتیب در مورد لایه نشانی قلع و آلومینیم دارای بیشترین و کمترین مقدار در محل زیر لایه است.

که در اینجا:

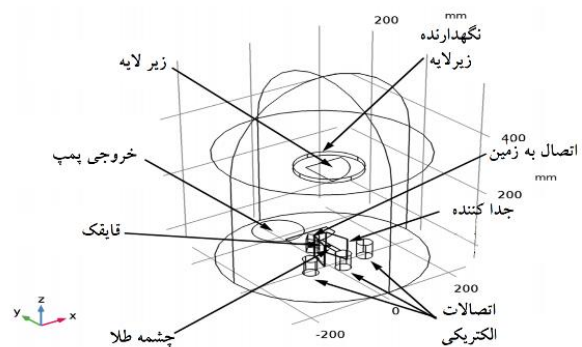
$$\langle C_{3D}^2 \rangle = \sqrt{\frac{4RT'}{8M_n}} \quad (7)$$

در طی زمان ضخامت لایه‌های نازک ایجاد شده h_{film} افزایش می‌یابد. این تحول زمانی برابر است با:

$$\frac{dh_{film}}{dt} = \frac{M_n G}{N_A \rho_{film}} \quad (8)$$

که در اینجا p چگالی لایه نازک است.

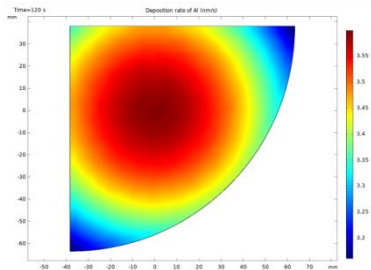
برای دستیابی به اطلاعات مناسب در مورد کمیت‌های موثر در فرایند لایه‌نشانی به روش PVD و تاثیر آنها بر لایه نازک باید معادلات حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی و اولیه حل می‌شوند. با توجه به اینکه در این مقاله هدف بررسی تاثیر نوع فلز بر ضخامت و یکنواختی لایه نازک فلزی است. بنابراین، فشار بخارهای فلزی در هر مرحله یکسان و دمای زیر لایه برابر با دمای محیط یا به عبارتی K ۲۹۳/۱۵ در نظر گرفته شده است. هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی که در تطابق با دستگاه موجود در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی است، در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۱ آورده شده است.



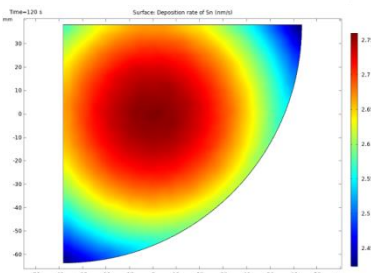
شکل ۱. هندسه و ساختار به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها.

به منظور شبیه‌سازی مش‌بندی نواحی متفاوت انتخاب شده است. این مش‌بندی در نواحی کوچک مثل سطح زیر لایه ریزتر و در نواحی بزرگتر مثل محفظه بزرگتر انتخاب شده است. نمایی از مش‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. ریزکردن زیاد مش‌بندی باعث زمان طولانی محاسبات

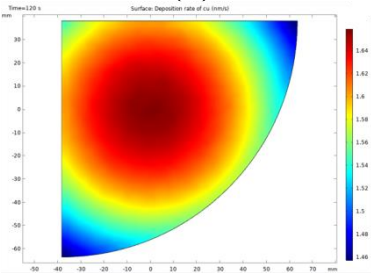
ضخامت لایه در ناحیه مرکز این لایه‌های نازک مشاهده شود و ضخامت لایه‌ها با دور شدن از مرکز کاهش یابد.



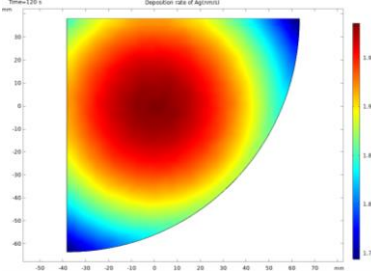
(الف)



(ب)



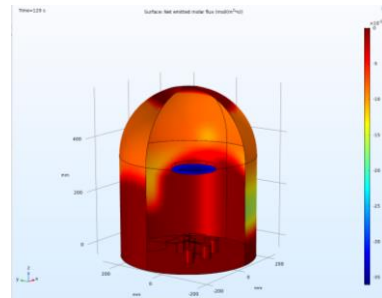
(ج)



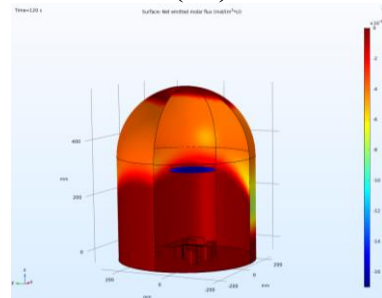
(د)

شکل ۴. نرخ لایه‌نشانی لایه‌های نازک (الف) آلومینیم، (ب) قلع، (ج) مس و (د) نقره.

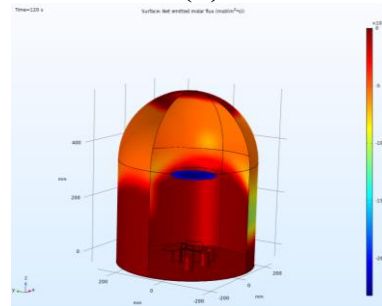
توزیع ضخامت و ضخامت لایه‌های نازک ایجاد شده دو کمیت مهم در لایه‌نشانی لایه‌های نازک هستند که در شکل ۵ برای این ۴ لایه فلزی به ازای فشار بخار ۱۰۰ پاسکال و در زمان لایه‌نشانی ۱۲۰s نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در صورتیکه شرایط یکسان فشار بخار و دمای سطح زیرلایه ایجاد شود، ضخامت لایه‌های نازک به ترتیب در مورد فلزات مس و آلومینیم



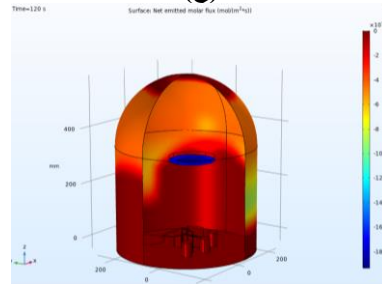
(الف)



(ب)



(ج)

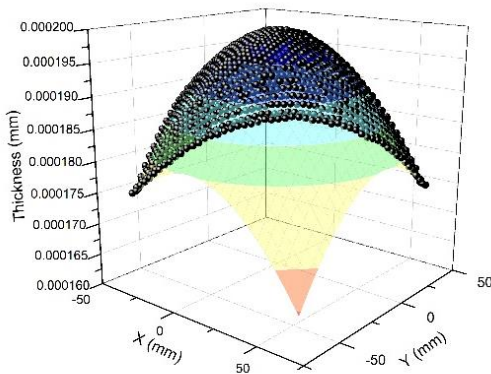


(د)

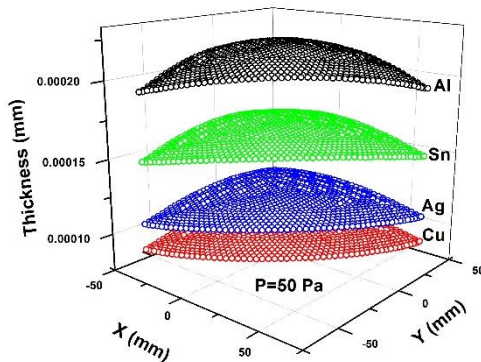
شکل ۳. توزیع شار مولکولی تابش شده از سطوح در طی ایجاد لایه‌های نازک (الف) آلومینیم، (ب) قلع، (ج) مس و (د) نقره.

در شکل ۴-الف تا ۴-د نمودار نرخ لایه‌نشانی لایه‌های نازک شکل ۳ بر زیرلایه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در تمام موارد بیشترین مقدار نرخ لایه‌نشانی در مرکز نمونه‌ها ایجاد شده است و نواحی با نرخ لایه‌نشانی یکسان تقریباً حلقه‌های متحد المركز هستند. همچنین، در تمام موارد نرخ لایه‌نشانی با دور شدن از مرکز کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود که بیشترین

بررسی توزیع ضخامت لایه‌ها نشان می‌دهد که توزیع ضخامت لایه‌های نازک در این شرایط با حالت فشار بخار ۱۰۰ پاسکال متفاوت است و تابع برازش مناسب در این شرایط تغییر می‌کند. نکته حائز اهمیت اینجاست که اگرچه ضخامت و توزیع ضخامت تغییر کرده است اما مقدار FWHM همچنان با تقریب خوبی ثابت و بدون تغییر مانده است که بیانگر عدم تاثیر پارامتر فشار بخار بر مقدار یکنواختی لایه نازک فلزی است.



شکل ۶. برازش توزیع ضخامت لایه مس (در فشار بخار ۱۰۰ پاسکال) با تابع گاوسی.



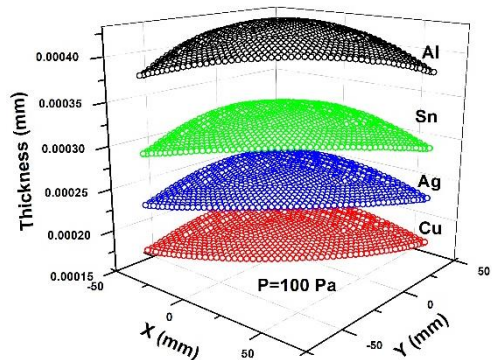
شکل ۷. ضخامت و توزیع ضخامت لایه‌های نازک آلومینیوم، قلع، مس و نقره در فشار بخار ۵۰ پاسکال و زمان ۱۲۰s.

با توجه به کاربرد، ضخامت‌های مختلف لایه‌های نازک فلزی مورد نیاز است. زمان لایه‌نشانی یکی از عوامل تاثیرگذار بر ضخامت لایه‌های نازک فلزی است، بنابراین، در شکل ۷-الف و ۷-ب به ترتیب نمودارهای تحول زمانی ضخامت لایه‌های نازک فلزی در فشارهای بخار ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال نشان داده شده است. نتایج نمودارهای ۸-الف و ۸-ب این قابلیت را فراهم می‌کنند که بتوان زمان مناسب برای ایجاد ضخامت لایه‌های فلزی مورد

کمترین و بیشترین مقدار است. همچنین، بیشترین ضخامت لایه‌های فلزی در مرکز وجود دارد و این ضخامت با دور شدن از مرکز کاهش می‌یابد. با تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مشخص شد که تابع گاوسی به صورت:

$$z = z_0 + A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_c}{w_1} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y-y_c}{w_2} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

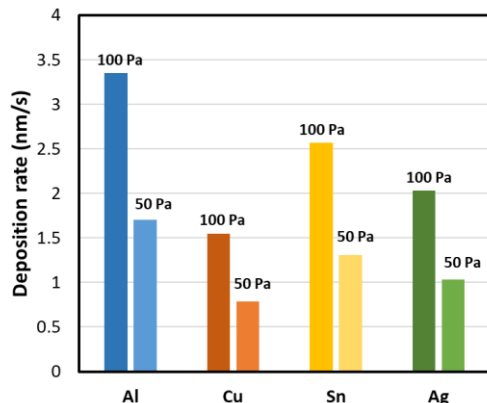
بهترین برازش را با توزیع ضخامت این لایه‌های فلزی دارد. شکل ۶ یک نمونه از برازش انجام شده را که در مورد لایه مس و در فشار ۱۰۰ پاسکال انجام شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۵. ضخامت و توزیع ضخامت لایه‌های نازک آلومینیوم، قلع، مس و نقره در فشار بخار ۱۰۰ پاسکال و زمان ۱۲۰s.

بررسی پهنای خط در نصف ماکزیمم FWHM ضخامت این لایه‌های نازک فلزی نشان می‌دهد که پهنای خط برای این فلزات تقریباً یکسان و برابر با ۱۰۹nm است. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد که اگرچه ضخامت لایه نازک به شدت به نوع فلز بستگی دارد اما مقدار یکنواختی آن مستقل از نوع مولکول است و احتمالاً به پارامترهای دیگری مثل فشار، ساختار محفظه و چیدمان قطعات، دمای زیرلایه و ... بستگی دارد.

به منظور بررسی تاثیر فشار بخار بر ضخامت و توزیع لایه‌های فلزی در شکل ۷ نمودار ضخامت لایه‌های فلزی در فشار ۵۰ پاسکال و زمان ۱۲۰s نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید ضخامت لایه‌های نازک در این شرایط بسیار کمتر از حالت پیشین است و فشار بخار بر ضخامت لایه‌های نازک بسیار تاثیرگذار است و به عنوان مثال بیشترین ضخامت لایه نازک مس در فشار ۱۰۰ پاسکال ۱۸۵ nm است و با کاهش فشار به ۵۰ پاسکال به ۹۴nm کاهش می‌یابد. همچنین،

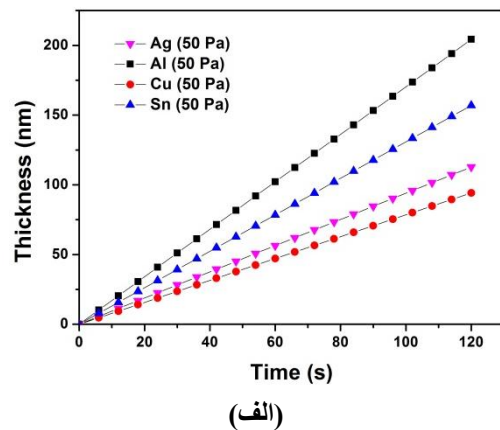


شکل ۹. نمودار نرخ لایه‌نشانی عناصر فلزی در فشار بخار ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال.

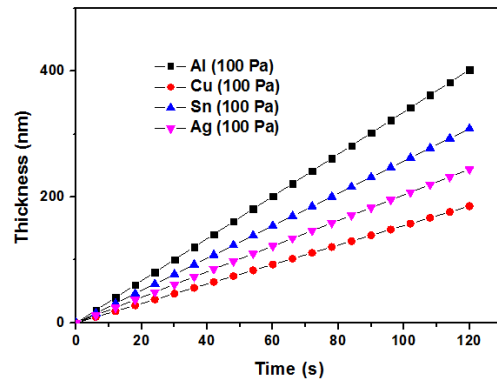
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله فرایند لایه‌نشانی چهار فلز کاربردی آلومینیم، مس، قلع و نقره با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها حاکی از وجود کمترین شار مولکولی تابش شده در محل زیرلایه است. همچنین بررسی‌ها در فشارهای ثابت ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال نشان می‌دهد که نوع عنصر بر روی توزیع ضخامت لایه نازک تاثیر چندانی ندارد. این در حالی است که تاثیر آن بر ضخامت لایه نازک بسیار زیاد است به طوری که ضخامت آلومینیم در فشار ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال در هر زمان بیش از ۲ برابر ضخامت لایه نازک مس است. همچنین، نتایج بررسی‌ها نشان داد که تغییر فشار بر روی ضخامت لایه نازک تاثیر بسزایی دارد و توزیع ضخامت لایه نازک با تغییر فشار تغییر می‌کند اما یکنواختی FWHM بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین، در این مقاله نرخ لایه‌نشانی و تحول زمانی ضخامت لایه نازک بر حسب زمان آورده شد که رهیافت مناسبی برای ایجاد لایه با ضخامت مناسب را با توجه به کاربرد مورد نظر فراهم می‌آورد.

نظر را به دست آورد. به عنوان مثال، زمان مناسب برای ایجاد ضخامت ۱۰۰ نانومتر از لایه‌های نازک آلومینیم، قلع، نقره و مس در فشار بخار ۵۰ پاسکال به ترتیب ۳۰، ۳۹، ۵۰ و ۶۴ ثانیه است. برای ایجاد ضخامت ۱۰۰ نانومتر از همین لایه‌ها در فشار بخار ۵۰ پاسکال به تقریباً دو برابر زمان لازم در فشار ۱۰۰ پاسکال نیاز است.



(الف)



(ب)

شکل ۸. تحول زمانی ضخامت لایه‌های نازک آلومینیم، قلع، مس و نقره در فشار بخار (الف) ۵۰ و (ب) ۱۰۰ پاسکال.

در شکل ۹، نمودار ستونی نرخ لایه‌نشانی لایه‌های متفاوت فلزی در فشارهای ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار لایه‌نشانی با فشار بخار ماده رابطه مستقیم دارد. با توجه به این نرخ لایه‌نشانی می‌توان شرایط مناسب برای ایجاد ضخامت مورد نظر از لایه فلزی را برای هر کاربرد پیش‌بینی کرد.



- [18] S. Kim et al., Applied Surface Science, 451, 232-240, (2018).
- [19] A. Gambardella et al., Applied Surface Science, 475, 917-925, (2019).
- [20] H. D. Espinosa and B. Prorok, Journal of Materials Science, 38(20), 4125-4128, (2003).
- [21] C. Claassens, J. Terblans, M. Hoffman, and H. Swart, Surface and Interface Analysis, 37(11), 1021-1026, (2005).
- [22] E. Chason and A. F. Bower, Journal of Applied Physics, 125(11), 115304-115315, (2019).
- [23] T. van Opstal and B. van der Linden, "Modeling of Chemical Vapor Deposition at the Pore-Scale Using Finite Cell Method," (2019).
- [24] M. Ohring, Materials science of thin films. Elsevier, (2001).
- [1] J. Li et al., Optics express, 15(4), 1939-1945, (2007).
- [2] M. Singh M, B. Sridhara, and T. Shridhar, In Materials Science and Engineering Conference Series, 149(1), 012071-012080, (2016).
- [3] C. E. Kennedy, "Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials," National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US)2002.
- [4] M. J. Kadhim, K. A. Sukkar, and A. S. Abbas, Materials Science and Engineering, 518(3) 032048-032048, (2016).
- [5] X. Xu et al., Science bulletin, 62(15)1074-1080, (2017).
- [6] T. Ma, H. Ariga, S. Takakusagi, and K. Asakura, Thin Solid Films, 646, 12-16, (2018).
- [7] P. A. Pivovarov et al., physica status solidi, (140), 1800685-1800690, 2019.
- [8] A. Babayigit et al., Scientific Reports, 6(1), 2016-2223, (2016).
- [9] S. Shao et al., Advanced Energy Materials, 8 (4), 1702019-170228, (2018).
- [10] T. B. Song, T. Yokoyama, S. Aramaki, and M. G. Kanatzidis, ACS Energy Letters, 2(4), 897-903, (2017).
- [11] Y. M. Lee, J. Park, B. D. Yu, S. Hong, M.-C. Jung, and M. Nakamura, The journal of physical chemistry letters, 9,(9), 2293-2297, (2018).
- [12] M. Hung, J. Genoe, P. Heremans, and S. Steudel, Applied Physics Letters, 112(26), 263502-263512, (2018).
- [13] T. Cai et al., ACS applied materials & interfaces, 10(30), 25350-25359, (2018).
- [14] T. Cai et al., Journal of colloid and interface science, 533, 95-105, (2019).
- [15] B. Li and T. Webster, Orthopedic biomaterials: advances and applications. Springer, (2018).
- [16] L. Pauksch et al., Acta biomaterialia, (10)1, 439-449, (2014).
- [17] X. Liu, K. Gan, H. Liu, X. Song, T. Chen, and C. Liu, Dental Materials, 33(9), 348-360, (2017).

منابع